

垂直跳動作からみた大学女子競技者の跳躍能力に関する バイオメカニクス的研究

Biomechanical investigation of jumping ability of female collegiate athletes by analyzing their movements during vertical jumps

湯田 淳¹⁾ 亀井 良和²⁾ 前川 剛輝³⁾
小野 恵李奈⁴⁾ 広野 泰子⁴⁾ 広川 真理子⁴⁾

*Jun YUDA, Yoshikazu KAMEI, Taketeru MAEGAWA,
Erina ONO, Yasuko HIRONO and Mariko HIROKAWA*

Abstract

The purpose of this study was to identify the characteristics of jumping abilities of female collegiate athletes by analyzing their movements during vertical jumps. 24 female collegiate athletes performed vertical and squat jumps on the laboratory floor. A high-speed video camera (300 fps) was used to record their movements, and their performance was analyzed using the direct linear transformation (DLT) technique. The ground reaction forces (GRFs) of both legs were determined using a force platform (500 Hz). The GRFs and two-dimensional coordinates of segment endpoints (23 points) were determined to calculate the kinetic, kinematic, and energetic variables. The effectiveness index (EI) of mechanical energy utilization in a vertical jump is computed as follows.

$$EI = \frac{\text{Effective Energy}}{\text{Mechanical Work}} = \frac{MgH_{\max} - MgH_{\text{toe-off}}}{W_{\text{wb}}}$$

Significant positive relationships were observed among the jumping height of a vertical jump, mechanical work (W_{wb} ; $r = 0.833$, $p < 0.001$), and EI ($r = 0.560$, $p < 0.01$). On the other hand, the relationship between the jumping height of a vertical jump and the mechanical energy transfer between segments was not very high (T_b ; $r = 0.106$, ns). Thus, increasing the EI by increasing the mechanical work is an important factor for increasing the jumping height of vertical jumps in female collegiate athletes. Further, when the jumping height of squat jumps and the percentage increase in the jumping height of vertical jumps relative to squat jumps were high, greater vertical GRFs, knee extension, and ankle plantar flexion torques observed during the first half of the leg extension phase. This force exertion in the lower limb by the counter movement of legs and swinging motion of arms is an effective technique for enhancing the performance in vertical jumps.

Keywords: *vertical jump, two-dimensional motion analysis, ground reaction force, effectiveness index, joint torque*

I. 緒言

短時間で全身を大きく加速させるための下肢の機能は多くのスポーツ種目において重要であり、ここでは下肢による爆発的なパワー発揮が求められる。このた

め、下肢のパワー発揮能力は、実験室およびフィールドにおいて様々な測定方法を用いて評価され、その結果はトレーニング計画立案等に有効に活用されている¹⁰⁾。

下肢のパワー発揮能力を評価するための測定法としては垂直跳が挙げられ⁹⁾、跳躍高をパフォーマンスの指標とした跳躍能力の測定として広く用いられている⁶⁾。垂直跳に関する研究は古くから行われているが、近年では、跳躍能力だけではなく、疾走能力、方向変換能力および敏捷性などとも関連が強いことも報

1) 日本女子体育大学 (准教授)

2) 日本女子体育大学 (講師)

3) 日本女子体育大学 (助手)

4) 日本女子体育大学大学院生

告されている^{12, 17, 19)}。垂直跳は、主に脚の伸展パワー発揮の結果としての跳躍高を測定するものであるが、そのパフォーマンスには下肢の反動動作と上肢の振込動作が影響を及ぼすという特徴がある。前者では、反動動作の後半からその動作が終了する時点において、後者では、振込動作の中盤から後半で大きな力を出すことに効果的であり、いずれも鉛直方向への跳躍にとって重要な力積を大きくすることに役立つ³⁾。このため、垂直跳の測定では、①脚の反動と腕振りをともなった動作に制限のない垂直跳 (VJ)、②脚の反動は用いるが、手は腰に当てて上肢の動作を制限した垂直跳 (CMJ)、③手は腰に当てて上肢の動作を制限し、下肢を屈曲させたスクワット姿勢から反動を用いないで行う垂直跳 (SJ) といった、規定の動作に従って被験者に試技を遂行させることとなる⁹⁾。中でもより一般的に用いられているのは脚の反動と腕振りをを用いた動作に制限のない垂直跳 (VJ) であるといえよう。ここでのパフォーマンスには上述の通り反動動作と振込動作といった技術的要因が含まれているため、その評価においては身体の使い方に関連した技術的特徴を考慮して検討する必要がある。

パフォーマンスに影響を及ぼす身体の使い方に関しては力学的エネルギーの観点から検討することができる。阿江と藤井²⁾は、スポーツにおけるパフォーマンス向上のためには、大きな力学的エネルギーを発揮するとともに、発揮した力学的エネルギーを有効に利用することが重要であると述べている。このような観点から各種動作様式における多くの報告がなされており、走^{4, 8)}、跳¹⁴⁾、投^{15, 18)}などにおけるパフォーマンス向上にとって有効な動作が明らかにされている。このように、力学的エネルギーの観点からの検討によって動作の有効性を評価することができ、跳躍運動におけるパフォーマンス向上に役立つ身体の使い方をより明確にできると考えられる。

本研究の目的は、垂直跳を対象として大学女子競技者における下肢のパワー発揮能力を力学的エネルギーの観点から動作と関連づけて検討し、大学女子競技者における跳躍能力向上のための指導に役立つ知見を得ることである。

Ⅱ. 方 法

1. 被験者

被験者には、大学女子競技者として、ハンドボール競技を専門とする女子大学選手 24 名 (身長 1.62 ± 0.05 m, 体重 58.8 ± 5.7 kg, 年齢 19.5 ± 1.3 歳) を用いた。計測に先立ってこれらの被験者には、研究のねらいや意義、計測状況、安全性などを説明し、実験への参加の同意を得た。

2. データ収集法

被験者には、実験室内のフロアに埋設されたフォースプラットフォーム (Kistler 社製, Type 9281B) 上で、垂直跳 (以下, VJ) およびスクワットジャンプ (以下, SJ) の 2 種の鉛直跳躍動作を行わせ、両脚に作用する地面反力を測定した。VJ は両腕の振込動作および下肢による反動動作を用いての垂直跳躍とした。一方, SJ では、両手部を腰に当てることによって上肢の振込動作を制限し、また下肢を屈曲させた姿勢 (膝関節が約 90 度) から行うことによって反動動作も制限した垂直跳躍とした。本研究では、このような振込動作および反動動作の有無に着目した 2 種の跳躍動作を用い、いずれの試技も全力での 1 回の跳躍を行わせた。試技は、1 台の高速度ビデオカメラ (CASIO 社製, EX-F1) を用いて右側方から撮影し (撮影スピードは 300 fps, 露出時間は $1/500$ s), 2 次元 DLT 法により 2 次元座標を算出するため、試技撮影前に動作面内の 4 か所にキャリブレーションボール (高さ 2.5m で 6 個のコントロールポイントを設置) を鉛直に立て、順次撮影した。フォースプラットフォームからの信号は専用アンプを介して A/D 変換し、サンプリング周波数 500 Hz でパーソナルコンピュータに取り込んだ。また、発光ダイオード (DKH 社製, PTS-110) の画像への映し込みおよび同期信号の A/D 変換ボードへの取り込みによって高速度ビデオカメラおよび地面反力データとの同期を行った。

3. 測定項目およびその算出法

1) 跳躍高の算出

2 種の垂直跳それぞれについて、フォースプラットフォームによって計測された地面反力の鉛直成分が

30Nを下回った時点を離地、その後の着地において30Nを超えた時点を接地とし、その間の時間を跳躍時間とした。その後、2種の垂直跳それぞれにおける跳躍高を以下の式(1)により算出した。

$$\text{跳躍高 (m)} = 9.81 \times \text{跳躍時間}^2 / 8 \quad (1)$$

このようにして算出した跳躍高を以下の式(2)に代入し、SJの跳躍高に対するVJの跳躍高の増大率を算出した。

$$\begin{aligned} \text{跳躍高増大率 (\%)} = \\ [(\text{VJ 跳躍高} - \text{SJ 跳躍高}) / \text{SJ 跳躍高}] \times 100 \quad (2) \end{aligned}$$

2) 2次元動作分析による各種パラメータの算出

本研究では、手、前腕、上腕、足、下腿、大腿、頭部および体幹の14部分からなる2次元剛体リンクモデルを採用し、振込動作および反動動作といった技術的要因を含むVJについて力学的パラメータを算出した。

(1) 2次元座標の算出

身体分析点は23点として反射マーカを貼付し、得られたVTR画像からVTR digitizer (DKH社製, Frame-Dias IV)によりデジタイズすることによって2次元座標を算出した。なお、本研究における跳躍動作はほぼ左右対称であるため、左半身の分析点の座標は右半身の値を代入することによって求めた。得られた2次元座標は、残差分析法²⁰⁾により最適遮断周波数を決定し、4次のButterworth low-pass digital filterにより平滑化した。用いた遮断周波数は4.0～13.0 Hzであった。

(2) キネマティクスのパラメータの算出

平滑化した2次元座標データから、阿江¹⁾の身体部分慣性係数を用いて各部分の質量、重心および慣性モーメントを算出した。図1に本研究における関節角度および部分角度の定義を示した。関節角度では、大転子から胸骨上縁を結ぶベクトルと大転子から膝関節点を結ぶベクトルのなす角を股関節角度、膝関節点から大転子を結ぶベクトルと膝関節点から足関節点を結ぶベクトルのなす角を膝関節角度、足関節点から膝関節点を結ぶベクトルと足関節点から拇指球を結ぶベクトルのなす角を足関節角度とした。部分角度では、大転子と胸骨上縁を結んだベクトル、大転子と膝関節点を結んだベクトルおよび足関節点と膝関節点を結んだベクトルが静止座標系におけるX軸となす角をそれぞれ体幹角、大腿角および下腿角とした。また、これらのデータを時間で数値微分することによって速度、

加速度および角速度、角加速度を算出した。

本研究では、被験者が静止状態から腕を振り始め、下降動作開始後に身体重心が最も下方に位置した時点を脚伸展開始時点、地面反力の鉛直成分が体重の10%を下回った時点を脚伸展終了時点(離地)とし、この脚伸展局面において分析を行った。

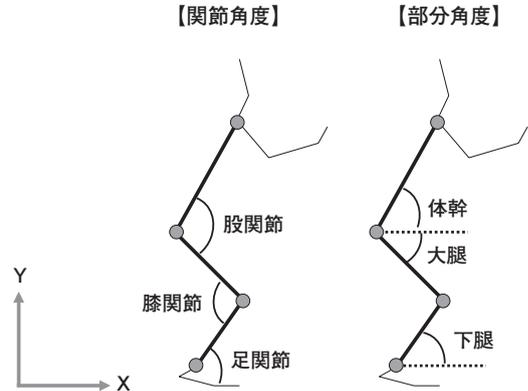


図1 本研究における角度の定義

(3) エナジェティクスのパラメータの算出

部分の力学的エネルギーを以下の式(3)により算出した。

$$E_{i,j} = m_i g h_{i,j} + \frac{1}{2} m_i v_{i,j}^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_{i,j}^2 \quad (3)$$

ここで、 $E_{i,j}$ は時刻jにおける部分iの力学的エネルギー、 m は部分の質量、 g は重力加速度、 h は部分の重心高、 v は部分重心の速度、 I は部分重心回りの主慣性モーメント、 ω は部分の角速度である。そして、以下の式(4)により、時刻間における部分の力学的エネルギーの差分を求め、これを部分の力学的エネルギー変化とした。

$$\Delta E_{i,j} = E_{i,j+1} - E_{i,j} \quad (4)$$

部分内および部分間で力学的エネルギーの交換および伝達がおくと仮定したPierrynowsky et al.¹⁶⁾の方法を用いて全身の力学的仕事(W_{wb})を以下の式(5)により算出した。

$$W_{wb} = \sum_{j=1}^{n-1} \left| \sum_{i=1}^s (\Delta E_{i,j}) \right| \quad (5)$$

ここで、 n は脚伸展局面に要したフレーム数、 s は部分の数である。また、Pierrynowsky et al.¹⁶⁾の方法を用いて身体内の力学的エネルギーの伝達量(T_b)を以下の式(6)および(7)により算出した。

$$W_w = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^s \left| \Delta E_{i,j} \right| \quad (6)$$

$$T_b = W_w - W_{wb} \quad (7)$$

ここで、 W_w は部分内で力学的エネルギーの交換はあるが部分間での力学的エネルギーの伝達がないと仮定した場合の力学的仕事である。

全身で発揮された力学的エネルギーを跳躍高に有効に利用されたかを評価するための指標として、阿江と藤井²⁾の提唱している力学的エネルギー利用の有効性指数 (EI: effectiveness index) を以下の式 (8) により算出した。

$$EI = \frac{MgH_{\max} - MgH_{\text{loc-off}}}{W_{wb}} \quad (8)$$

ここで、 M は身体質量、 H_{\max} は跳躍後の最大の身体重心高、 $H_{\text{loc-off}}$ は離地時の身体重心高であり、分子にはパフォーマンスを表す指標として跳躍による被験者の位置エネルギーの増分 (身体重心の最高点での位置エネルギーから離地時の位置エネルギーを減じた値) を代入した。

(4) キネティクスのパラメータの算出

算出されたキネマティクスのデータおよび地面反力データを基に、足部から運動方程式を解くことにより下肢関節トルクを算出した。なお、股および膝関節トルクは伸展方向を正、足関節トルクは底屈方向を正とした。また、関節トルクと関節角速度の積を関節トルクパワーとした。

4. グループ分け

1) 項で算出した VJ における跳躍高の平均 (0.31 ± 0.05 m) を基に、被験者を上位群 13 名と下位群 11 名にグループ分けした。

5. データの規格化および統計処理

本研究で得られた時系列データは脚伸展局面に要した時間で規格化した。また、エナジェティクスのパラメータ、関節トルクおよびトルクパワーは被験者の身体質量 (kg) で、地面反力は被験者の体重 (身体質量と重力加速度の積で、本研究では bw と表記) で除して示した。

測定結果において、VJ 跳躍高の上位群および下位群との差を検定するために対応のない t 検定を行った。また、2 変数の関係を見るためにピアソンの積率相関係数を算出した。これらの有意水準はいずれも 5% 未満とした。

Ⅲ. 結果

1. パフォーマンスと各種パラメータとの関係

表 1 に上位群および下位群における被験者の身体特性およびパフォーマンスを平均値および標準偏差で示した。身長、体重、年齢および跳躍高増大率のいずれにおいても群間に有意差はみられなかった。VJ 跳

表 1 被験者の身体特性およびパフォーマンス

	身長 (m)	体重 (kg)	年齢 (歳)	VJ 跳躍高 (m)	SJ 跳躍高 (m)	跳躍高増大率 (%)
上位群 (n = 13)	1.63 ± 0.05	57.5 ± 4.7	19.8 ± 1.1	0.34 ± 0.03	0.27 ± 0.03	27.4 ± 9.6
下位群 (n = 11)	1.61 ± 0.06	60.4 ± 6.6	19.3 ± 1.5	0.27 ± 0.04	0.20 ± 0.03	35.7 ± 10.1
差	ns	ns	ns	上位群 > 下位群***	上位群 > 下位群***	ns

*** : $p < 0.001$

躍高および SJ 跳躍高はいずれも上位群 (VJ height, 0.34 ± 0.03 m; SJ height, 0.27 ± 0.03 m) の方が下位群 (VJ height, 0.27 ± 0.04 m; SJ height, 0.20 ± 0.03 m) よりも有意に大きかった ($p < 0.001$)。

表 2 に垂直跳 (VJ) における上位群および下位群のエナジェティクスのパラメータを平均値および標準偏差で示した。部分内および部分間で力学的エネル

ギーの交換および伝達がおくと仮定した場合の力学的仕事 (以下、 W_{wb} と表記)、部分内で力学的エネルギーの交換はあるが部分間での力学的エネルギーの伝達がないと仮定した場合の力学的仕事 (以下、 W_w と表記) のいずれも上位群 (W_{wb} , 7.63 ± 0.67 J/kg; W_w , 9.23 ± 0.93 J/kg) の方が下位群 (W_{wb} , 6.60 ± 0.70 J/kg; W_w , 8.11 ± 1.09 J/kg) よりも有意に大

表2 垂直跳におけるエナジェティクスのパラメータ

	W_{wb} (J/kg)	W_w (J/kg)	T_b (J/kg)	EI
上位群 (n = 13)	7.63 ± 0.67	9.23 ± 0.93	1.60 ± 5.54	0.45 ± 0.04
下位群 (n = 11)	6.60 ± 0.70	8.11 ± 1.09	1.51 ± 0.74	0.40 ± 0.05
差	上位群>下位群**	上位群>下位群*	ns	上位群>下位群*

** : p<0.01, * : p<0.05

きかった (それぞれ p<0.01, p<0.05). 力学的エネルギーの伝達量 (以下, T_b と表記) では群間に有意差はみられなかったが, 力学的エネルギー利用の有効性指数 (以下, EI と表記) では上位群 (0.45 ± 0.04) の方が下位群 (0.40 ± 0.05) よりも有意に大きかった (p<0.05).

図2に垂直跳 (VJ) における跳躍高とエナジェティクスのパラメータとの関係を示した. W_{wb} (r=0.833) および W_w (r=0.679) のいずれにおいても跳躍高との間に有意な正の相関がみられた (p<0.001). T_b と跳躍高との間には有意な相関はみられなかったが, EI と跳躍高との間には有意な正の相関がみられた (r=0.560, p<0.01).

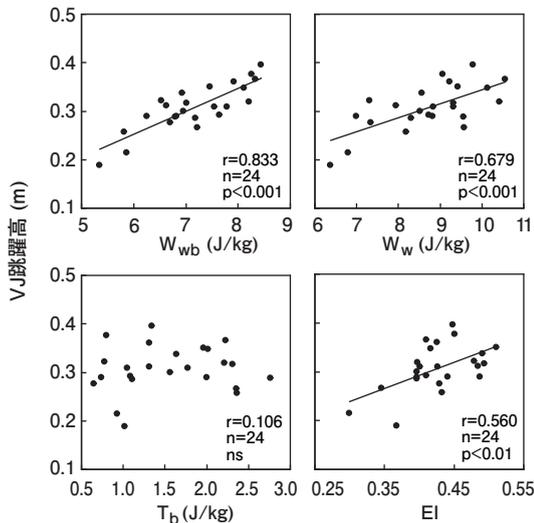


図2 垂直跳における跳躍高とエナジェティクスのパラメータとの関係

2. 跳躍能力のタイプ別にみた垂直跳動作の特徴

図3にスクワットジャンプ (SJ) 跳躍高と垂直跳 (VJ) における跳躍高増大率との関係を示した. SJ 跳躍高と跳躍高増大率の間には有意な負の相関がみ

られた (r=-0.678, p<0.001). 本研究では, SJ 跳躍高の平均 (0.24 ± 0.05 m) および跳躍高増大率の平均 (31.2 ± 10.5 %) を基に, 被験者を, SJ 跳躍高および跳躍高増大率のいずれも大きい Excellent タイプ (n=4, VJ 跳躍高 0.35 ± 0.03 m), SJ 跳躍高が大きく跳躍高増大率が小さい Power タイプ (n=8, VJ 跳躍高 0.34 ± 0.03 m), SJ 跳躍高が小さく跳躍高増大率が大きい Technique タイプ (n=7, VJ 跳躍高 0.27 ± 0.05 m), SJ 跳躍高および跳躍高増大率のいずれも小さい Poor タイプ (n=5, VJ 跳躍高 0.28 ± 0.01 m) といった4つにタイプ分けした.

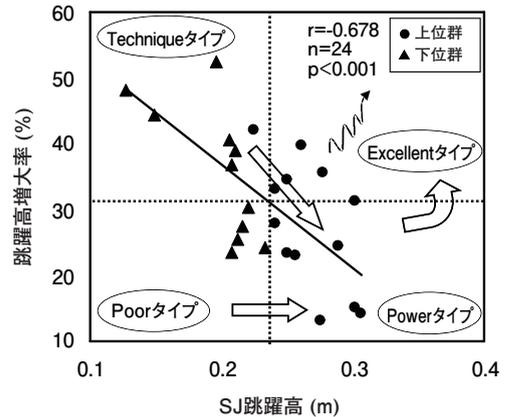


図3 スクワットジャンプ跳躍高と垂直跳における跳躍高増大率との関係

本研究では, SJ 跳躍高が同様の値 (0.28 m) を示した Excellent タイプ典型例 (VJ 跳躍高 0.38 m, 跳躍高増大率 35.5 %) および Power タイプ典型例 (VJ 跳躍高 0.31 m, 跳躍高増大率 13.1 %) について, キネマティクスおよびキネティクスのパラメータを用いて垂直跳動作を比較した. 図4に垂直跳 (VJ) における Excellent タイプ典型例および Power タイプ典型例の部分角度の変化を示した. 体幹角は, いずれのタイプも脚伸展動作開始から増大し, 動作終了へ向

けて体幹は起き上がっていた。また、脚伸展動作中、Excellentタイプの方がPowerタイプよりも大きな値を示し、体幹はより起き上がっていた。大腿角は、いずれのタイプも脚伸展動作開始から漸増し、脚伸展動作中盤以降急増することによって大腿は急激に起き上がっていた。また、脚伸展動作開始から30%時付近までにおいてはPowerタイプの方が値は大きく、大腿はより起き上がっていた。下腿角は、いずれのタイプも脚伸展動作開始から漸増し、脚伸展動作終盤において急増することによって下腿は急激に起き上がっていた。また、脚伸展動作開始から70%時付近までにおいてはPowerタイプの方が値は大きく、下腿はより起き上がっていた。

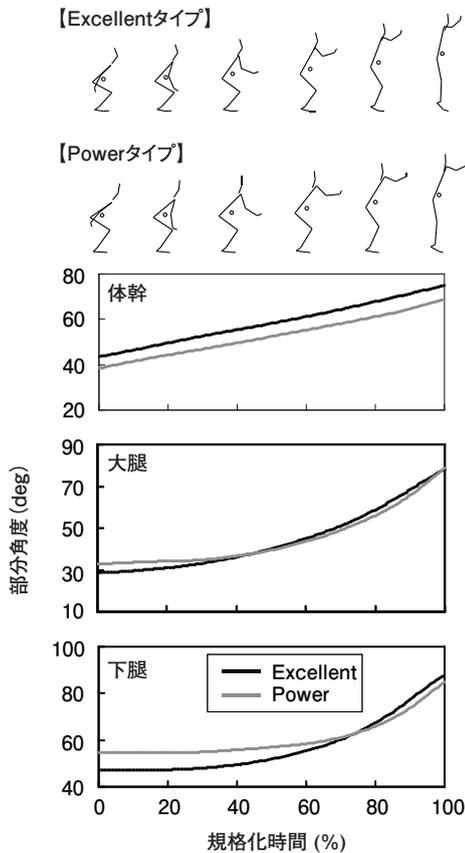


図4 垂直跳における部分角度の変化 (Excellentタイプ典型例vs.Powerタイプ典型例)

図5に垂直跳(VJ)におけるExcellentタイプ典型例およびPowerタイプ典型例の地面反力の変化を示した。前後成分においては、Excellentタイプでは脚伸展動作開始後わずかに後方成分が増大し、その後

80%時付近で後方成分のピークに達していた。一方、Powerタイプでは脚伸展動作開始から50%時付近まではほぼゼロの値であり、その後80%時付近で後方成分のピークに達していた。鉛直成分においては、Excellentタイプでは脚伸展動作開始時にピークがみられ、その後80%時付近まで漸減した後に、動作終了へ向けて急激に減少していた。一方、Powerタイプでは脚伸展動作開始から増大し、60%時付近でピークに達した後に、動作終了へ向けて急激に減少していた。

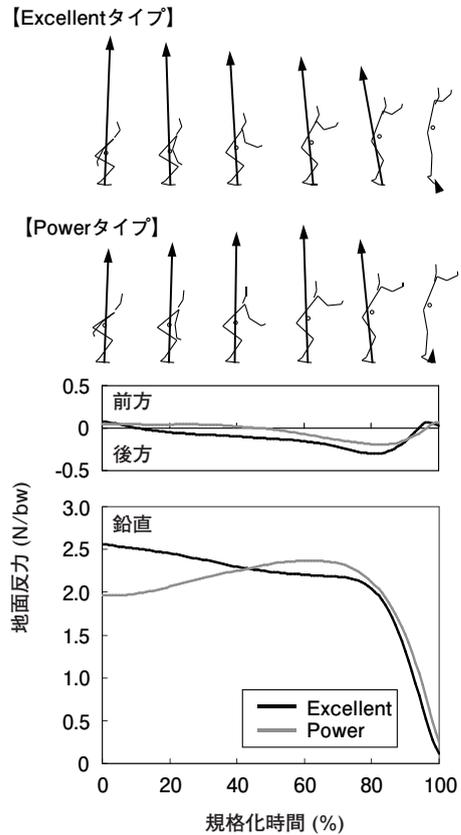


図5 垂直跳における地面反力の変化 (Excellentタイプ典型例vs.Powerタイプ典型例)

図6に垂直跳(VJ)におけるExcellentタイプ典型例およびPowerタイプ典型例の下肢関節トルクおよび関節トルクパワーの変化を示した。股関節において、関節トルクは、Excellentタイプでは脚伸展動作開始時に大きな伸展トルクを示しており、動作終了へ向けて減少していた。一方、Powerタイプも脚伸展動作開始時においてほぼ同様の値であり、ほぼ同

様の変化パターンを示したが、20%時付近以降の値はExcellentタイプよりも大きかった。関節トルクパワーは、いずれのタイプも脚伸展動作開始から正パワーがみられ、60%時付近でピークに達した後に、動作終了へ向けて減少していた。なお、Powerタイプでは、20%時付近においては一時的な正パワーの減少がみられた。また、Powerタイプにおける脚伸展動作終盤での正パワー減少の程度は小さく、90%時付近ではExcellentタイプよりも顕著に大きな正パワーを示した。膝関節において、関節トルクは、Excellentタイプでは脚伸展動作開始時に大きな伸展トルクを示しており、動作終了へ向けて減少した後、90%時付近では屈曲トルクに転じていた。一方、Powerタイプでは脚伸展動作前半において一定の比較的大きな伸展トルクがみられ、その後70%時付近以降はExcellent

タイプと同様の変化パターンを示した。関節トルクパワーは、いずれのタイプも脚伸展動作開始から正パワーが増大し、80%時付近でピークに達した後に、動作終了へ向けて急激に減少して負パワーに転じていた。脚伸展動作前半においてはExcellentタイプの方がPowerタイプよりも大きな正パワーを示した。足関節において、関節トルクは、いずれのタイプも脚伸展動作開始時に比較的大きな底屈トルクを示し、わずかに増大した後に、80%時付近以降から動作終了へ向けて減少していた。関節トルクパワーは、いずれのタイプも脚伸展動作開始から正パワーが増大し、80%時付近でピークに達した後に、動作終了へ向けて急激に減少していた。脚伸展動作中、Excellentタイプの方がPowerタイプよりも大きな正パワーを示し、ピーク値もExcellentタイプの方が大きかった。

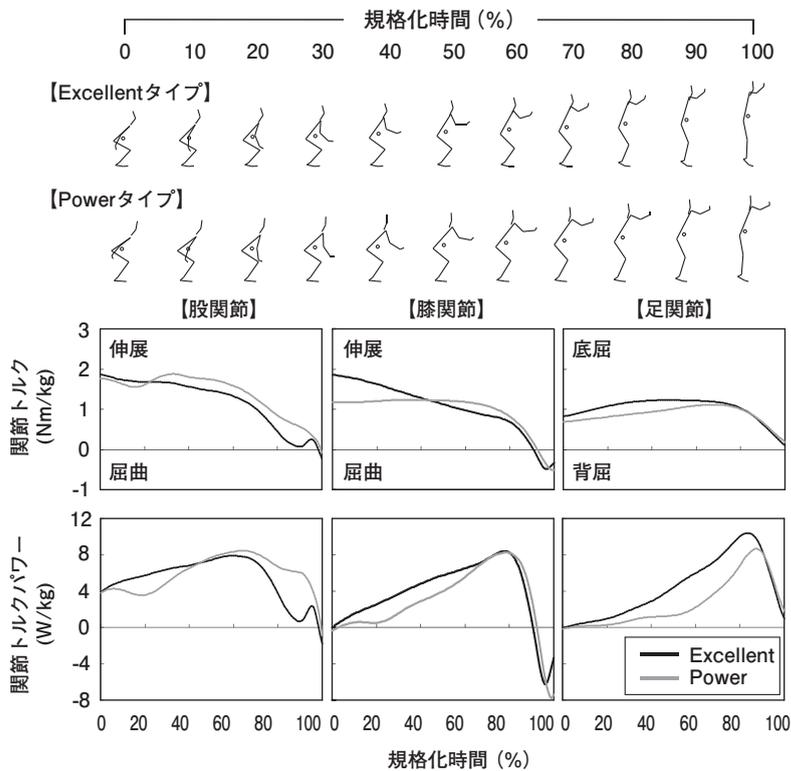


図6 垂直跳における下肢関節トルクおよび関節トルクパワーの変化 (Excellentタイプ典型例vs.Powerタイプ典型例)

Ⅳ. 考 察

VJ 跳躍高は上位群の方が下位群よりも有意に大きかった (表 1)。このことは、上位群では、大きな下肢のパワー発揮能力とともに、反動動作と振込動作といった身体の使い方に優れていたことを示唆するものといえよう。また、EI をみると、上位群の方が下位群よりも有意に大きく (表 2)、VJ 跳躍高との間にも有意な正の相関がみられた (図 2)。このことは、垂直跳において大きな跳躍高を獲得するためには EI を高める必要があることを示している。本研究では、全身で発揮された力学的エネルギーを跳躍高に有効に利用されたかを評価するための指標として EI を求めたが、これは、全身による出力をどの程度有効にパフォーマンス (跳躍高) に利用できたかといった身体の使い方に関する指標と捉えることができる。本研究における EI 算出式をみると、分母は全身の力学的仕事 (W_{wb})、分子は跳躍による被験者の位置エネルギーの増分 (跳躍のパフォーマンスに相当) となっている。したがって、計算上、EI を大きくするためには、分母を小さくして分子を大きくする必要があり、これは、小さな仕事で大きなパフォーマンスを得ることが効果的であることと解釈できる。ここで、EI 算出式の方母となる W_{wb} の値をみると、上位群の方が下位群よりも有意に大きく (表 2)、VJ 跳躍高との間には有意な正の相関がみられた (図 2)。この結果は、大きな跳躍高を得るためには全身で大きな仕事をするのが重要であることを意味している。一方、本研究では、身体内の力学的エネルギーの伝達量 (T_b) を求めているが、これは全身における部分間での力学的エネルギーの流れを反映しており、これらのパラメータが走、跳、投といった運動におけるパフォーマンス向上に重要な要因となることが報告されている^{4, 8, 14, 15, 18)}。これらのことから、本研究において、 T_b と VJ 跳躍高との関係を見ることによって、力学的エネルギーの流れといった観点からの身体の使い方が垂直跳におけるパフォーマンスに及ぼす影響を検討できると考えられる。 T_b をみると、上位群と下位群とで有意差はみられず (表 2)、VJ 跳躍高との間にも有意な相関はみられなかった (図 2)。このことは、跳躍高の増大にとって T_b は重要な要因とはならず、身体内 (部分間) で効果的にエネルギーを流すといった技術は垂直跳の跳躍高に影響を及ぼさないことを示しているといえる。このようにみえてく

と、大学女子競技者におけるパフォーマンス向上に役立つ EI の高め方としては、小さな仕事によって得た力学的エネルギーを上手く利用するといった技術ではなく、まずは大きな仕事を行うことが重要で、そのうえで大きな跳躍高を得るといったパワー発揮に関連した技術が要求されると考えられる。

前述のような VJ 跳躍高の増大のために求められる技術は、VJ における跳躍高増大率からも以下の通り解釈できる。SJ に対する VJ での跳躍高の増分は、脚による反動動作および腕による振込動作による効果と考えられ、この増大率が大きい者ほど身体の使い方に優れることが予想される。しかし、本研究における跳躍高増大率において、上位群と下位群との間に有意な差はみられず、下位群の方が大きい傾向 ($p < 0.1$) がみられるなど (表 1)、このような身体の使い方に優れるほどパフォーマンス (VJ 跳躍高) に劣るという結果が示された。ここで、下肢のパワー発揮能力のみを強く反映すると考えられる SJ をみると、上位群の方が下位群よりも SJ 跳躍高は有意に大きく (表 1)、高いパフォーマンスを得るためには下肢の高いパワー発揮能力が求められることが推察される。これらのことから、大学女子競技者の垂直跳において高いパフォーマンスを獲得するためには、必要条件として大きな仕事 (パワー発揮) をする能力が重要となると推察される。

これまでの検討を踏まえると、大学女子競技者の垂直跳のパフォーマンスをより良く評価するためには、下肢のパワー発揮能力と身体の使い方とを関連づけて検討する必要があると考えられる。図 3 に下肢のパワー発揮能力のみを強く反映すると考えられる SJ 跳躍高と、VJ における跳躍高増大率との関係を示した。SJ 跳躍高および跳躍高増大率によって被験者は図に示したような 4 つのタイプに分けられる。すなわち、SJ 跳躍高および跳躍高増大率ともに大きいタイプ (Excellent タイプ)、SJ 跳躍高が大きく跳躍高増大率が小さいタイプ (Power タイプ)、SJ 跳躍高が小さく跳躍高増大率が大きいタイプ (Technique タイプ)、SJ 跳躍高および跳躍高増大率ともに小さいタイプ (Poor タイプ) である。本研究において、VJ 跳躍高が有意に小さかった下位群では、その被験者の多くが Poor および Technique タイプに分類されるが、上位群において SJ 跳躍高が有意に大きかった (表 1) ことを考慮すると、これらの被験者が VJ 跳躍高を増大させるためにはまずは SJ 跳躍高を増大させる必要

があるといえる（図の右方向へのシフト）。ここでの課題は、主に下肢のパワー発揮能力の向上といった体力的要因にあるといえよう。なお、跳躍高増大率の算出においては、SJ 跳躍高に対する VJ 跳躍高の増大分が求められるため、算出式の分母となる SJ 跳躍高の増大は、最終的には跳躍高増大率を小さくするといった結果を導きやすくすることに繋がる。このことを考慮すると、Poor および Technique タイプでは、SJ 跳躍高が増大すると、その結果として Power タイプへと移行するものと推測される。その後は、跳躍高増大率を大きくすることが重要となるが（図の上方向へのシフト）、ここでの課題は下肢による大きなパワー発揮をともなった効果的な身体の使い方の獲得にあるといえる。最終的には、VJ 跳躍高の増大のために Excellent タイプへと移行し、さらに図の右上方へシフトするようにトレーニングの方向性を検討していくことが重要であると考えられる。このように、下肢のパワー発揮能力と身体の使い方とを関連づけて検討することは、次に改善すべき課題を明確にするために役立つといえよう。

前述の通り、より効果的にパフォーマンスを向上させるためには、より大きなパワー発揮の下での身体の使い方を習得する必要がある。したがって、ここでは、図3における分類に従った Excellent タイプおよび Power タイプにおける典型例を比較し、効果的な身体の使い方について考察を進めることとする。地面反力の変化をみると（図5）、鉛直成分は脚伸展動作開始から40%時付近までは Excellent タイプの方が大きく、脚伸展動作開始ではその差は大きかった。垂直跳においてより大きな跳躍高を得るためには鉛直力積を大きくする必要があるため³⁾、実際に本研究の両タイプについて力積を算出したところ、Excellent タイプ (0.522 Ns/bw) の方が Power タイプ (0.506 Ns/bw) よりも大きかった。これらのことから、本研究の Excellent タイプで VJ 跳躍高が大きかった主要因として、脚伸展動作開始から大きな地面反力を得ることができ、身体に大きな力積を作用させることができたことが挙げられる。地面反力は下肢の伸展による地面への力発揮の反作用であるため、その増大には下肢関節によるトルク発揮が重要となる。下肢関節トルクをみると（図6）、膝関節伸展トルクおよび足関節底屈トルクはいずれも脚伸展動作開始から中盤まで Excellent タイプの方が大きかったが、股関節伸展トルクは20%時付近以降において Power タイプの方が

大きかった。垂直跳における跳躍高の増大にとっては膝関節の重要性が指摘されている⁷⁾ことを考慮すると、Excellent タイプでは主に、脚伸展動作開始時から大きな膝関節伸展トルクを発揮できたことが大きな跳躍高の獲得に貢献したと考えられる。下肢による反動動作は、主働筋によるエキセントリックな収縮がコンセントリックな収縮に先立って生じる伸張—短縮サイクル (Stretch Shortening Cycle: SSC) 運動¹³⁾であるが、これは反動動作の後半からその動作が終了する時点において大きな力を出すことに効果的である³⁾。このような反動動作の効果が生じるメカニズムとして弾性エネルギーの利用や主動作における筋活動の増強が挙げられ、このような筋活動の増強が仕事量の増大を引き起こすことが示唆されている^{5,11)}。これらのことを考え合わせると、Excellent タイプでは下肢の反動動作を十分に活用でき、大きな膝伸展トルクを発揮することができたことが跳躍高の獲得に貢献したと推察される。また、上肢の振込動作が、振込動作の中盤から後半で大きな力を出すことに効果的である³⁾ことを考慮すると、Excellent タイプでは腕の振込動作にも優れていた可能性が示唆される。

部分角度をみると（図4）、脚伸展動作中、Excellent タイプでは大きな体幹角を示し、体幹はより起き上がっていた。また、大腿および下腿角においては、脚伸展動作開始後しばらくは Excellent タイプでの値が小さく、各部分の起き上がりは小さかった。これらのことから、Excellent タイプの脚伸展動作の特徴は、動作遂行中に、大腿および下腿の起き上がりを抑えつつ、早いタイミングで体幹を起こしていたことにあるといえる。一方、地面反力の前後成分をみると（図5）、Power タイプでは脚伸展動作開始から50%時付近まではほぼゼロの値であったのに対して、Excellent タイプでは後方成分がみられた。このことは、脚伸展動作開始から中盤まで Excellent タイプでは地面反力ベクトルが身体の後方に向いていたことを示している。これによって、膝関節の後方を通過する地面反力ベクトル（図5）は膝関節のより遠くを通過すると考えられるため、このことによる膝関節のモーメントアームの増大は膝関節伸展トルクを大きくすると推察される。また、Excellent タイプにみられた脚伸展動作中盤までのより下腿が前傾している姿勢もまた膝関節のモーメントアームの増大に繋がるため、膝関節伸展トルク増大に貢献すると考えられる。以上のことから、Excellent タイプでは、膝関節での力発揮

にとって効果的な動作姿勢（身体の使い方）をとることによって、大きな跳躍高を獲得していたと考えられる。

V. まとめ

本研究の目的は、垂直跳を対象として大学女子競技者における下肢のパワー発揮能力を力学的エネルギーの観点から動作と関連づけて検討し、大学女子競技者における跳躍能力向上のための指導に役立つ知見を得ることであった。得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- ① VJ 跳躍高および SJ 跳躍高は上位群の方が下位群よりも有意に大きかった。また、SJ 跳躍高に対する VJ 跳躍高の増大率は、上位群と下位群との間に有意な差はみられず、下位群の方が大きい傾向がみられた。
- ② W_{wb} および EI ともに上位群の方が下位群よりも有意に大きく、いずれも VJ 跳躍高との間に有意な正の相関があった。また、 T_b は上位群と下位群との間に有意な差はみられず、VJ 跳躍高との間にも有意な相関はみられなかった。
- ③ SJ 跳躍高および跳躍高増大率のそれぞれの平均値によって、被験者は、SJ 跳躍高および跳躍高増大率ともに大きいタイプ (Excellent タイプ)、SJ 跳躍高が大きく跳躍高増大率が小さいタイプ (Power タイプ)、SJ 跳躍高が小さく跳躍高増大率が大きいタイプ (Technique タイプ)、SJ 跳躍高および跳躍高増大率ともに小さいタイプ (Poor タイプ) にわけられた。
- ④ 地面反力の鉛直成分は脚伸展動作開始から 40% 時付近までは Excellent タイプの方が大きく、脚伸展動作開始ではその差は大きかった。また、鉛直力積は Excellent タイプの方が Power タイプよりも大きかった。
- ⑤ 膝関節伸展トルクおよび足関節底屈トルクはいずれも脚伸展動作開始から中盤まで Excellent タイプの方が大きかったが、股関節伸展トルクは 20% 時付近以降において Power タイプの方が大きかった。
- ⑥ 脚伸展動作中、Excellent タイプでは大きな体幹角を示し、体幹はより起き上がっていた。また、大腿および下腿角においては、脚伸展動作開始後しばらくは Excellent タイプでの値が小さく、各

部分の起き上がりは小さかった。

以上のことから、大学女子競技者における跳躍高増大に役立つ EI の高め方としては、小さな仕事によって得た力学的エネルギーを上手く利用するといった技術ではなく、まずは大きな仕事を行うことが重要であり、そのうえで大きな跳躍高を得るといったパワー発揮に関連した技術が要求されることが明らかとなった。そして、このような下肢による大きなパワー発揮をともなった効果的な身体の使い方は、十分な下肢の反動動作と上肢の振込動作による、脚伸展動作開始後の大きな膝関節伸展トルクおよび足関節底屈トルクを発揮するための効果的な技術にあることが明らかとなった。なお、このためには、動作遂行中に、大腿および下腿の起き上がりを抑えつつ、早いタイミングで体幹を起こすような動作が有効であることが示唆された。

本研究は平成 23 年度日本女子体育大学共同研究「大学女子競技者のジャンプ動作についてのバイオメカニクス的研究」における成果の一部をまとめたものである。

謝辞

本実験に被験者として快くご協力頂いた日本女子体育大学ハンドボール部選手各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. Japanese Journal of Sports Sciences, 15(3): 155-162.
- 2) 阿江通良, 藤井範久 (1996) 身体運動における力学的エネルギー利用の有効性とその評価指数. 筑波大学体育科学系紀要, 19: 127-137.
- 3) 阿江通良, 藤井範久 (2002) スポーツバイオメカニクス 20 講. 朝倉書店, 東京.
- 4) 阿江通良, 中田和寿, 榎本靖士, 横澤俊治, 窪康之, 山田哲 (2000) 一流スプリンターの下肢における力学的エネルギーの変化. 平成 11 年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告 No. II 競技種目別競技力向上に関する研究 — 第 23 報 —, pp.123-125.
- 5) Bobbert, M. F., Gerritsen, K. G. M., Litjens, M. C. A. and van Soest, A. J. (1996) Why is countermovement jump height greater than squat jump height?. Medicine and Science in Sports and Exercise, 28 (11): 1402-1412.
- 6) Canavan, P. K. and Vescovi, J. D. (2004) Evaluation of power prediction equations: Peak vertical jumping power

- in women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36 (9) : 1589-1593.
- 7) Eckert, H. M. (1968) Angular velocity and range of motion in the vertical and standing broad jumps. *The Research Quarterly*, 39 (4) : 937-942.
- 8) 榎本靖士, 阿江通良, 岡田英孝, 藤井範久 (1999) 力学的エネルギー利用の有効性からみた長距離走の疾走技術. *バイオメカニクス研究*, 3 (1) : 12-19.
- 9) 深代千之 (1992) 瞬発性運動における発揮パワーの評価—垂直跳, 階段駆け上がり, ランニングについて—. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 11 (3) : 176-187.
- 10) 深代千之 (1996) スポーツ科学への招待. ベースボール・マガジン社, 東京.
- 11) 平山邦明, 杉崎範英, 加藤えみか, 金久博昭, 福永哲夫, 川上泰雄 (2010) 腱スティフネス, 筋力および筋活動が反動動作による機械的仕事量増強の個人差に与える影響. *体育学研究*, 55 : 33-43.
- 12) 岩竹淳, 山本正嘉, 西薗秀嗣, 川原繁樹, 北田耕司, 岡子浩二 (2008) 思春期後期の生徒における加速および全力疾走能力と各種ジャンプ力および脚筋力との関係. *体育学研究*, 53 : 1-10.
- 13) Komi, P. V. and Buskirk, E. R. (1972) Effect of eccentric and concentric muscle conditioning on tension and electrical activity of human muscle. *Ergonomics*, 15 (4) : 417-434.
- 14) 窪康之, 阿江通良 (2005) 力学的エネルギーからみた立幅跳の踏切動作における技術トレーニングの効果. *バイオメカニクス研究*, 9 (4) : 205-216.
- 15) 窪康之, 藤井範久, 阿江通良 (1999) 技術トレーニングによる動作の変化に関するバイオメカニクス的研究—メディシンボールのバック投げにおける力学的エネルギーの流れに着目して—. *バイオメカニクス研究*, 3 (3) : 170-178.
- 16) Pierrynowsky, M. R., Winter, D. A. and Norman, R. W. (1980) Transfer of mechanical energy within the total body and mechanical efficiency during treadmill walking. *Ergonomics*, 23 (2) : 147-156.
- 17) 笹木正悟, 金子聡, 矢野玲, 浅野翔太, 永野康治, 櫻井敬晋, 福林徹 (2011) 方向転換走と直線走および垂直跳びの関係—重回帰分析を用いた検討—. *トレーニング科学*, 23 (2) : 143-151.
- 18) 島田一志, 阿江通良, 藤井範久, 川村卓, 高橋佳三 (2004) 野球のピッチング動作における力学的エネルギーの流れ. *バイオメカニクス研究*, 8 (1) : 12-26.
- 19) Vescovi, J. D. and McGuigan, M. R. (2008) Relationships between sprinting, agility, and jump ability in female athlete. *Journal of Sports Sciences*, 26 (1) : 97-107.
- 20) Winter, D. A. (1990) *Biomechanics and motor control of human movement*. pp.41-43, John Wiley and Sons Inc., New York.

(平成23年9月14日受付)
(平成23年11月22日受理)